

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Broušení keramiky

Grinding of Ceramic

Student: Jiří Vítek
Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Vladimír VRBA, CSc.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Vítek

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Broušení keramiky
Grinding of Ceramic

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Problematika obrábění keramiky.
3. Návrh progresivní technologie broušení vybraných součástí.
4. Diskuze experimentů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [2] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [3] VASILKO, K. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov : COFIN Prešov, 2007. 338 s. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [4] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [5] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie - část 2. Základy řízení jakosti*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2006. 86 s. ISBN 80-248-1209-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

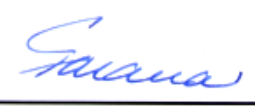
Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry





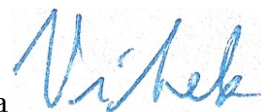
prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23. 5. 2011

Podpis studenta

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'V. Heřek', is written over a light blue rectangular grid background.

Prohlašuji že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se úplně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola banská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠBTUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/ 1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23. 5. 2011

Podpis studenta

Jiří Vítek

Krapkova 5

787 01 Šumperk

ANOTACE BAKALÁŘKÉ PRÁCE

VÍTEK, J. *Broušení keramiky*. Ostrava : Katedra obrábění a montáže VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2011, 49 s. Bakalářská práce: Doc.Ing.Vrba Vladimír CSc.

Bakalářská práce je zaměřena na broušení keramických materiálů. Zkoumá jaký vliv má náhodná změna parametrů broušení na kvalitu povrchu. Na začátku práce je představena firma, ve které byl experiment prováděn. Poté je uveden popis a výrobní proces materiálů, které firma vyrábí a které jsou dále použity v experimentu. Následně jsou vysvětleny základní pojmy obrábění, technologie broušení a popis nástroje. Tyto údaje poté sloužili k určení parametrů, které byly použity v pokusu. Samotný experiment je zaměřen na kvalitu povrchu materiálu. Zkoumá, jak se mění kvalita povrchu po náhodné změně parametrů broušení.

ANNOTATION OF BACHELOR WORK

VÍTEK, J. *Grinding of ceramics*. Ostrava : Department of working and montaging VŠB- Technical university of Ostrava, 2011, 49 p. Bachelor work: Doc.Ing.Vrba Vladimír CSc.

Bachelor work is focused to grinding of ceramic materials. It examines the impact of the random change of grinding parameters to surface quality. In the beginning of the work there is presented the company, in which was the experiment realized. As next is introduced the description and manufacturing process of materials, which are used in my experiment and which the company produces. Finally, the basic concepts of working, grinding technology and tool description are explained. These data were then used to determine the parameters, which were used in experiment. The whole experiment is focused to surface quality of material. It examines how the surface quality is changed after random change of grinding parameters.

Obsah

1. Úvod	9
2. Obecná charakteristika daného problému.....	10
2.1 Profil firmy CeramTec Czech Republic s.r.o.	10
2.2 Materiály vyráběné v CeramTec Czech Republic s.r.o.	11
3. Problematika obrábění keramiky	14
3.1 Výrobní proces	14
3.1.1 Příprava směsi karbidů a pojiva	14
3.1.2 Izostatické lisování	14
3.1.3 Předslinování	15
3.1.4 Zelené obrábění	15
3.1.5 Slinování.....	17
3.1.6 Tvrdé obrábění.....	18
3.2 Obecné pojmy a terminologie	19
3.2.1 Pohyby při obrábění	20
3.3 Technologie broušení	20
3.3.1 Charakteristické znaky procesu broušení	21
3.3.2 Přehled základních metod broušení.....	24
3.3.2.1 Vnější broušení do kulata.....	24
3.3.2.2 Vnitřní broušení do kulata.....	27
3.3.2.3 Broušení na plocho (broušení rovinné)	29
3.3.3 Brousící kotouč s diamantem	30
3.3.3.1 Charakteristika	31
3.3.3.2 Zrnitost brusiva	33
3.3.3.3 Koncentrace brusiva (K)	33
4. Návrh progresivní technologie broušení vybraných součástí.....	34
5. Diskuse experimentu	36
6. Technicko-ekonomické zhodnocení	44
7. Závěr.....	47

Seznam použité literatury	48
Seznam příloh.....	49

Seznam použitých symbolů a značek

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
Al ₂ O ₃	-	Oxid hlinitý (umělý korund)
CNC	-	Computer numerical control
D	mm	Průměr obrobku nebo nástroje, zrnitost brusiva
I	-	Počet broušení
K	-	Koncentrace brusiva
NC	-	Numerical control
Ra	μm	Drsnost povrchu
Rt	μm	Drsnost povrchu
Rz	μm	Drsnost povrchu
SiC	-	Karbid křemíku
SiSiC	-	Infiltrovaný karbid křemíku
SSiC	-	Slinovaný karbid křemíku
TiC	-	Karbid titanu
WC	-	Karbid wolframu
a _e	mm	Hloubka úběru
b	mm	vzdálenost mezi hroty brusky
f _r	mm	Radiální posuv kotouče nebo obrobku
h	mm	výška hrotu brusky
n _w	ot.min ⁻¹	Otáčky obrobku
p	mm	Přídavek na broušení
pH	-	Kyselost
t	mm	Šířka brousícího kotouče
t _{str}	min	Strojní čas
v _c	m.s ⁻¹	Řezná rychlost
v _f	m.min ⁻¹	Posuvová rychlost
v _{fa}	m.min ⁻¹	Vodorovná obvodová rychlost
v _{pk}	m.min ⁻¹	Obvodová rychlost
v _w	m.min ⁻¹	Svislá obvodová rychlost
x	mm	Tloušťka brusiva

1. Úvod

Keramické materiály jsou v dnešní době jedním z nejvíce fascinujících materiálů. 24 hodin denně se keramické materiály používají po celém světě jako součásti strojů, systémů nebo v lidském těle. Keramické materiály mohou sloužit tam, kde jiné materiály selhávají díky svým specifickým vlastnostem. Společnost CeramTec Czech Republic se specializuje na výrobu produktů ze sintrovaných (SSiC) a infiltrovaných (SiSiC) karbidů křemíku.

Rok od roku se kladou vyšší nároky na výrobky, zejména na jejich drsnost povrchu. To vše z důvodu vyšších požadavků na tu nejvyšší kvalitu výrobků, jejich životnost, ale hlavně na vyšší odolnost proti opotřebení. Pro svou vysokou tvrdost a malou houževnatost jsou keramické materiály špatně obrobitelné a lze je prakticky dokončovat pouze broušením, lapováním nebo některými nekonvenčními metodami obrábění. Broušení je hlavní dokončovací metoda, pomocí které se získá vysoká kvalita a přesnost obrobené plochy.

Tato práce je zaměřena právě na broušení, co by dokončovací metodu keramických materiálů. Cílem je navrhnout progresivnější metodu broušení. Konkrétně je zkoumán vliv jednotlivých změn parametrů broušení na kvalitu povrchu.

2. Obecná charakteristika daného problému

Kořeny společnosti CeramTec jsou integrální součástí globální historie technické keramiky, která se od roku 1994 vyrábí v CeramTec Czech Republic se sídlem v Šumperku. Technická keramika zde probíhá celým výrobním procesem, tedy od přípravy směsi, přes slinování, až k samotnému obrábění. Právě obrábění se bude věnovat tato práce. [10]

2.1 Profil firmy CeramTec Czech Republic s.r.o. [10]

CeramTec Czech Republic se sídlem v Šumperku je dceřinnou společností německé společnosti CeramTec a kořeny společnosti jsou integrální součástí globální historie technické keramiky. Tato historie zahrnuje více než 115 roků výroby. Jen několik málo společností v oblasti keramiky má tak silné základy. V průběhu své úspěšné historie docházelo k různým fúzím a převzetím firem, které zahrnovaly různé segmenty společnosti. Ve stručném shrnutí, mezi jiným American Lava, 3M, General Electric, Rosenthal, Hoechst, Cerasiv, SPK, Ceramaseal, AlSiMag, a Dynamit Nobel byly důležité milníky v různých odvětvích této úspěšné společnosti.

Výroba ve společnosti CeramTec Czech Republic s.r.o. byla zahájena v roce 1994, když CeramTec přesunul výrobu technických výrobků na bázi karbidu křemíku (SiC). Od té doby byly SiC materiály neustále dále vyvíjeny. V současné době se vyrábí tři verze materiálu 6– infiltrovaný karbid křemíku, hrubozrnný a jemnozrnný (SiSiC – ROCAR SiG and ROCAR SiF) a slinovaný karbid křemíku (SSiC – ROCAR S1). Další materiály se nacházejí ve fázi vývoje. Výroba byla rozšířena o druhou výrobní linku pro dokončování těsnících destiček pro sanitární techniku, která představuje jednu z největších evropských výrobních kapacit ve svém oboru. Těžiště výroby spočívá v broušení, leštění a výstupní kontrole těsnících destiček vyráběných z kysličníku hlinitého.

Systému kvality managementu CeramTecu Česká republika byl certifikován dle normy ISO 9001 firmou IQNet a DQS, envirometální systém byl certifikován dle normy EN ISO 14001 by DQS.



Obr. 2.1 Systému kvality managementu CeramTecu Česká republiky byl certifikován dle normy ISO 9001 firmou IQNet a DQS, envirometální systém byl certifikován dle normy EN ISO 14001 by DQS. [10]

2.2 Materiály vyráběné v CeramTec Czech Republic s.r.o. [10]

CeramTec Czech Republic, se sídlem v Šumperku, vyrábí dvě základní materiálové modifikace z karbidu křemíku (SiC):

- *infiltrovaný (reaction-bonded) karbid křemíku* – hrubozrnný SiSiC (Rocar[®] SiG), jemnozrnný (Rocar[®] SiF)
- *slinovaný karbid křemíku* – SSiC (Rocar[®] S1)

Oba materiály vynikají vysokou teplotní odolností, velmi nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, velmi vysokou tvrdostí, ořezuvzdorností, vysokou korozní odolností, nízkou měrnou hustotou, nepropustností pro plyny a kapaliny, výbornou tepelnou vodivostí, výbornými kluznými vlastnostmi a mezi keramickými materiály vysokou odolností vůči teplotním šokům.

Vlastnosti SiC výrobky zvyšují provozní životnost v porovnání s klasickými kovovými materiály, a tak prodlužují intervaly údržby a snižují náklady na údržbu.

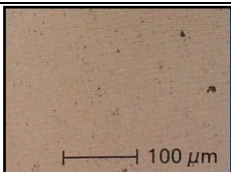
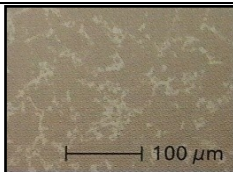


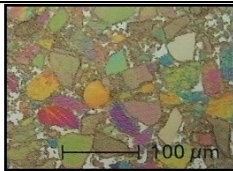

SiSiC je klasickým materiálem s širokým spektrem uplatnění v aplikacích, kde nejsou vhodné levnější vyspělé materiály (kompozity, grafit, Al₂O₃- korund apod.). Chemická odolnost je omezena do pH = 10. Drsnost neobrobeného materiálu je pod 6,3.

SSiC materiál má vyšší užitnou hodnotu díky vyšší teplotní a chemické odolnosti (v celém rozsahu pH – dle chemické odolnosti). Výrobní náklady jsou vyšší, než u SiSiC, proto nalezne uplatnění v nejnáročnějších aplikacích materiálů z karbidu křemíku. Drsnost neobrobeného materiálu je Ra 0,8 až 1,6.

Tab. 2.1 Charakteristické vlastnosti

Všeobecné vlastnosti	Jednotky	SSiC ROCAR S1	SiSiC ROCAR SiG,SiF
Obecné vlastnosti			
Hustota	g/cm ³	3,15	3,07
Absorpční schopnost	%	0	0
Plynová propustnost	%	0	0
Mechanické vlastnosti			
Pevnost v ohybu	Mpa		
20°C		410	340
1000°C		-	340
Pevnost v tahu	Mpa	3500	>3500
E-modul	Gpa	430	340
Tvrdost	HV 10	2300	
	HV 0,2		1200(Si), 2700(SiC)
Pevnost v lomu K _{IC}	Mpa m ^{1/2}	4,4	4
Weibull modul		>10	>14
Poissonova konstanta		0,17	0,17
Hrubost Ra	mm	<0,04	0,02
Tepelné vlastnosti			
Tepelná vodivost	W/mK		
20-100°C		115	120
Koeficient tepelné roztažnosti	10 ⁻⁶ .K ⁻¹		
20-100°C		2,8	3,4
20-400°C		3,6	4,1
20-600°C		4,1	4,4
20-1000°C		4,6	4,9
Tepelná kapacita	J/gK		
cp 20-100°C		0,6	0,7
cp 1000°C		-	1,3
Dielektrická pevnost	KV/mm	-	-
Dielektrická konstanta (10MHz)	eps	53,5 - 57,8	59 - 455
Součinitel diel. ztrát (10MHz)		-	-
Max. použitelná teplota	°C		
Oxidující, redukující, neutrální		-	-
Bez nabíjení na vzduchu		1800	-
V interní atmosféře		1500	1350
Odolnost vůči kolísání teploty	°C	350	1100

Tab. 2.2 Povrch a mikrostruktura

	SSiC ROCAR S1	SiSiC ROCAR SiG	SiSiC ROCAR SiF
Povrch			
Mikrostruktura			

Tribologické použití

Typické použití součástí ROCAR je dynamické těsnění u mechanických ucpávek a kluzkých ložisek, např. čerpadlech a hnacích systémech. Zde karbid křemíku ROCAR přináší hospodárnější řešení než kovy a má mnohonásobně delší životnost i při použití v agresivních a vysokoteplotních médiích.

Vytvoření filmu maziva mezi kluznými součástmi je zajištěno topografií povrchu.

V případě krátkodobého běhu na sucho či kombinovaným namáháním suchým a smíšeným třením, je mezikrystalická pevnost zrn dostatečná pro zabránění poškození. Všechny tyto vlastnosti karbidu křemíku značky ROCAR přináší mimořádně spolehlivá a nízkoúdržbová řešení. Klasickou ukázkou je těsnění lodních hřídelů, kde jsou běžné velmi dlouhé servisní intervaly a jakýkoli neplánovaný servis je velmi komplikovaný. ROCAR Karbid křemíku na palubě lodi. Těsnící kroužky s vnějším průměrem 900mm udržují hladký běh hnacího systému Queen Mary 2. Jejich výroba z monolitického oblouku je možná pouze technologií používanou v CeramTec.

Abrazivní použití

Spotřeba materiálu kvůli vysokému tepelnému zatížení, tření, opotřebení a korozi je vysokým nákladovým faktorem u mnoha průmyslových instalací. V důsledku náročných environmentálních a vnitřních zatížení u strojů pro potravinářský průmysl, chemické instalace, turbíny a energetiku mohou kovové součásti rychle dosáhnout svých mezí.

Díky své mimořádné tvrdosti, odolnosti vůči opotřebení a dobré tepelné vodivosti je v těchto případech karbid křemíku ROCAR ideálním materiálem. Koroze a kapalinová eroze je potlačena stejně účinně jako opotřebení třením. Materiály lze bez problému použít v potravinářském odvětví.

3. Problematika obrábění keramiky

Pro svou vysokou tvrdost a malou houževnatost jsou keramické materiály špatně obrobitelné a lze je prakticky dokončovat jen některými nekonvenčními metodami obrábění, lapováním nebo broušením. Broušení je dokončovací metoda, která při specifických vlastnostech keramiky zajistí vysokou přesnost rozměrů a tvaru i jakost dokončeného povrchu.

3.1 Výrobní proces

Ve firmě CeramTec Czech Republic s.r.o. výroba technické keramiky probíhá celým procesem.

3.1.1 Příprava směsi karbidů a pojiva [1]

Přidáním pojiva jsou výrazně ovlivněny vlastnosti výsledného výrobku. Hlavním cílem je vytvoření jemnozrnné, homogenní práškové směsi karbidů a pojícího kovu. Směs se mele za sucha nebo v kapalném prostředí. Po dokončení procesu je důležité, aby byla zrna dokonale obalena jemnějším práškem pojícího kovu. Po skončení mlecího procesu je nutné směs dokonale vysušit. Mletí obvykle probíhá v kulových mlýnech pomocí mlecích kuliček, které vytvářejí rázový a třecí účinek.



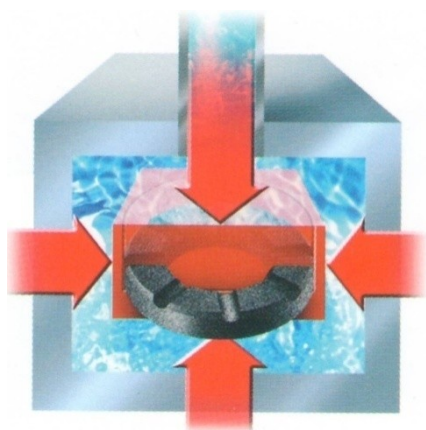
Obr. 3.1 Příprava směsi karbidů a pojiva [10]

3.1.2 Izostatické lisování [1]

Prášková směs se umístí do uzavřené formy z latexu nebo silikonového kaučuku. Tím je ochráněna před tlakovou kapalinou. U izostatického lisování se používají dvě varianty, které se liší způsobem vyvíjení tlaku. Mechanickým tlakem pístu (suchá metoda) nebo hydraulickým tlakem kapaliny (mokrý metoda).

Pro malé výlisky se používá suchá metoda, která lze plně automatizovat. Nejprve se forma vloží do tlakové komory, kde se poté naplní práškovou směsí. Po uzavření formy se prostor mezi formou a stěnou komory zaplní pracovní kapalinou. Píst se pohybuje v ose komory zdola nahoru, tlačí na pružnou formu a tím zvyšuje tlak v pracovní kapalině.

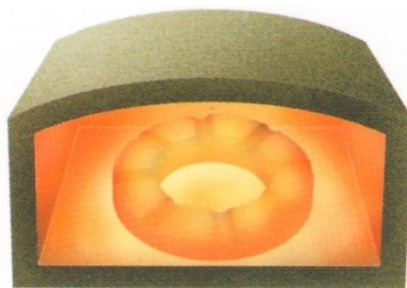
Mokrý metoda se používá pro rozměrné součásti. Nelze ji plně automatizovat. Forma se naplní mimo tlakovou komoru. Po uzavření se setře prášek a vysaje se přebytečný vzduch. Aby nedošlo při lisování k poškození formy, vloží se do ocelového koše a poté je spolu s ním umístěna do tlakové komory. Po uzavření komory je tlakem pracovní kapaliny (emulze, voda, olej) vylisována součást.



Obr. 3.2 Izostatické lisování [10]

3.1.3 Předslinování [1]

Slisované těleso je vloženo do pece a následně ohřáto. Těleso je pečeno při teplotách 700-850°C. Díky tomu se nezmění tvar ani chemické složení, ale odstraní se nežádoucí plastifikátory. Navíc je těleso zpevněno a vhodné pro zelené obrábění.



Obr. 3.3 Předslinování [10]

3.1.4 Zelené obrábění [6] [8]

Zelené obrábění se používá pro obrobení drážek a složitějších tvarů tělesa, které si určí zákazník. Lze obrábět pouze s diamantovými nástroji.



Obr. 3.4 Zelené obrábění [10]

- *Soustružení*

Při soustružení se obráběná součást otáčí, zatím co nástroj koná posuv, popřípadě přísuv. Při soustružení se nůž posouvá ve směru axiálním nebo radiálním. U směru axiálním jde o soustružení podélné. U směru radiálním pak o soustružení čelní (zápich, upichování). Přísuv se děje vždy kolmo k posuvu, tj. při podélném soustružení radiálně, při čelním soustružení axiálně. Při kopírovacím soustružení je výsledný posuv složen z posuvu podélného a příčného. Výsledný řezný pohyb (řezná dráha) při podélném soustružení probíhá ve šroubovici, při soustružení čelním ve spirále. Směr řezného pohybu je určen tečnou v jednotlivých bodech řezné dráhy. Obvykle je při soustružení posuv v poměru k řezné rychlosti malý a můžeme přibližně nahradit pohyb ve šroubovici pohybem v kružnici. Tento pohyb pak nazýváme hlavním pohybem (rotačním).

- *Frézování*

Při frézování se otáčí nástroj – fréza, který má na svém obvodu břity – zuby. Relativní posuvný pohyb je buď tangenciální při frézování obvodovém (válcové frézování, frézování válcovou frézou), nebo radiální při frézování čelním. Při obojím frézování je hlavním břitem ten břit, jehož ostří leží na obvodové ploše nástroje.

Při frézování je charakteristické, že tříska mění svůj průřez, a to od minima do maxima nebo opačně.

Při obvodovém frézování se jeví relativní posuv obrobku vzhledem k ose nástroje ve dvou smyslech. Pohybuje-li se v okamžiku záběru břit v protisměru pohybu, jedná se o nesousledné frézování. Sousedné frézování nastává, jestliže je v okamžiku záběru, posouvá se složka hlavního pohybu v témže smyslu posuvu.

Sledujeme-li ostří nástroje v jeho relativním pohybu vzhledem k obrobku, je při nesousledném frézování dráha výsledného pohybu prodloužená cykloida. Při sousledném frézování je to zkrácená cykloida.

3.1.5 Slinování [1]

Při slinování se těleso vkládá do pece, kde je následně ohříváno a ochlazováno. Materiál se tímto způsobem zhutňuje. Pro materiál SSiC se používá klasický proces slinování. Ovšem materiál SiSiC je zalit křemíkem pro zaplnění zbylých pórů.

- *Slinutí SSiC*

Těleso je vloženo do slinovací pece. Tam je ohříváno (2000 °C) a následně ochlazováno. Po skončení celého procesu je výrobek zcela zhutněn. Má požadovanou mikrostrukturu a mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti.

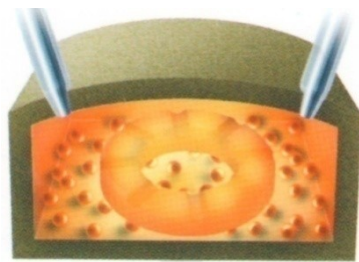
Slinování je proces, ve kterém je materiál zhutňován. Vytvoří se hranice mezi zrny tvrdé fáze a difuzní procesy přeskupí jednotlivé složky. Výrobek obsahuje tvrdé karbidické části a pojivo, které spojuje zrna tvrdé části.



Obr. 3.5 Slinování [10]

- *Infiltrace křemíkem SiSiC*

Jedná se o podobný proces slinování jako u materiálu SSiC. Těleso se ovšem zalije křemíkem a poté se společně s ním ohřeje (1600 °C). Křemík slouží k zaplnění zbylých pórů. Tímto způsobem lze vyrobit tvarová tělesa s velmi komplikovanou geometrií bez jakékoliv porózy. Jelikož reakce similizování probíhá téměř bez smrštění, mohou být dodrženy velmi úzké výrobní tolerance.



Obr. 3.6 Infiltrace křemíkem [10]

- *Otryskávání* [8]

Pro zbavení zbylého rozteklého křemíku na povrchu se použije mechanický způsob upravení materiálu otryskáváním, při kterém se tryskáci materiál vrhá velikou rychlostí proti povrchu součásti. Tryskací prostředek jako nástroj vyvolává při dopadu v jeho povrchových vrstvách kvalitativní přeměny, přičemž vzniká charakteristická morfologie povrchu. Účinek tryskání je dán zejména rychlostí letu zrna, úhlem dopadu, jakostí substrátu a jeho tvrdostí. Jako materiál se používá křemičitý písek, který má ostrohranná zrna a lépe odstraní zbylý křemík.



Obr. 3.7 Pískování [10]

3.1.6 Tvrdé obrábění

Výrobek má požadovanou mikrostrukturu a mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Jako finální metody pro dokončení požadované drsnosti a rozměry výrobku jsou nejvhodnější broušení, lapování a leštění.

- *Broušení* [8]

Broušení je hlavní dokončovací metoda. Získává vysokou kvalitu a přesnost obrobené plochy. Při broušení se do materiálu zabírají jednotlivá brusná zrna, na nichž jsou vytvořeny břity s nepravidelnými řeznými úhly. Tato brusná zrna jsou pevně vázána na brusný kotouč pomocí pojiva kovového, galvanického nebo pryskyřičného. Odebírá se nepravidelná tříska, protože zrna mají různé geometrické formy a jsou nepravidelně rozmístěna. Při broušení vzniká velké teplo a je nutné chladit obrobek i kotouč.



Obr. 3.8 Broušení [10]

- *Lapování* [8]

Při lapování není brusivo (brusná zrna) pevně vázáno v kotouči, brousku nebo kamenu, nýbrž je volně neseno lapovací pastou nebo lapovací tekutinou. Brusivo přitlačuje na lapovaný povrch lapovací podložka (hladítko). Vzhledem k malému přitlačnému tlaku lze dosáhnout velmi jemného povrchu.

- *Leštění* [8]

Leštění se provádí při docílení konečné požadované drsnosti povrchu. Používají se tvrdší látkové kotouče a mastnější i ostřejší pasty a větší obvodové rychlosti.



Obr. 3.9 Leštění [10]

3.2 Obecné pojmy a terminologie [4]

Obrábění je technologický proces, kterým vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti, a to odebráním částic materiálu pomocí účinků mechanických, elektrických, chemických apod., případně jejich kombinacemi.

Řezání je obrábění, při kterém dochází k odebrání částic materiálu ve tvaru třísky břitem (řeznou hranou, ostřím) řezného nástroje.

Obrábění je realizováno v soustavě obrábění (SNOP). Tato soustava se skládá z následujících čtyř částí (rovněž se uvažují pouze tři části absentující přípravek): obráběcí stroj (S), řezný nástroj (N), obrobek (O), přípravek (P).

Obrobek představuje objekt obráběcího procesu a je to obráběná nebo již obrobena součást či dílec. Z geometrického hlediska je obrobek charakterizován rozměry a tvary jednotlivých ploch.

Přídavek je vrstva materiálu mezi obráběnou a obrobenou plochou obrobku, kterou odstraňujeme obráběním.

Odebíraná vrstva je část přídavku přikloněná k ploše řezu, která je odřezávaná jedním břitem ve formě třísky.

Třísky je odříznutá a deformovaná odebíraná vrstva materiálu obrobku.

Obráběcí nástroj je aktivním prvkem v soustavě obrábění. Právě nástroj v interakci s obrobkem umožňuje realizaci řezného procesu. Uskutečňuje řezání tím, že svou pracovní částí tj. břitem vniká do materiálu obrobku a odděluje z něho postupně částice ve tvaru třísky.

3.2.1 Pohyby při obrábění [4]

Hlavní řezný pohyb je vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který realizuje obráběcí stroj. Směr hlavního řezného pohybu je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří.

Řezná rychlost v_c je vyjádřena jako okamžitá rychlost řezného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

Posuvný pohyb (vedlejší řezný pohyb) je realizován jako další relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. U některých způsobů obrábění tento pohyb není.

Posuvová rychlost v_f je okamžitá rychlost výsledného pohybu v uvažovaném bodě ostří vzhledem k obrobku.

Výsledný řezný pohyb je vycházející pohyb ze současného hlavního a posuvového pohybu. Vznikne vektorovým součtem obou pohybů.

Přísmuv je pohyb nástroje nebo obrobku, kterým se nastavuje nástroj do pracovní polohy na požadovanou šířku záběru a_e .

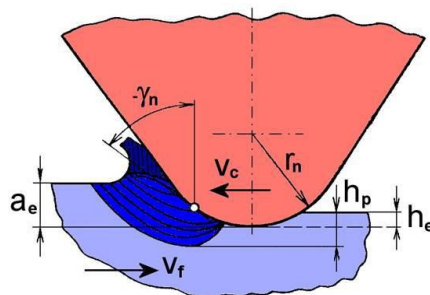
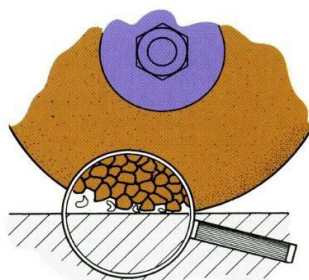
3.3 Technologie broušení

Broušení je hlavní dokončovací metoda, která umožňuje získat vysokou kvalitu a přesnost obrobenej plochy. Je to tedy metoda obrábění mnohobřitým nástrojem s geometricky nedefinovatelnými řeznými hranami (zrna brusiva), které jsou spojeny

pojivem. Patří mezi nejstarší metody obrábění vůbec. V současné době se díky možnostem rozšiřuje z původního pouze dokončovacího obrábění i do oblasti hrubování a se svou produktivitou je srovnatelné s ostatními metodami obrábění. Velký význam má převážně při výrobě velkých ložisek. [4]

3.3.1 Charakteristické znaky procesu broušení [4]

- Z důvodu různé geometrické formy zrn a jejich nepravidelných rozmístění v brousícím nástroji se odebírá nepravidelná tříska.



Obr. 3.10 Nepravidelné úběry třísky [4] Obr. 3.11 Úhly jednotlivých zrn brusiva [4]

- Záporné úhly čela jednotlivých zrn jsou různé a obvykle velké (ovlivňují oblast primární plastické deformace).
- Zrna jsou schopna přenášet pouze malé řezné síly (slabé upevnění zrn pojivem), při obrábění dochází k samovolnému uvolňování jednotlivých zrn nebo jejich částí („samoostření“ brousícího kotouče).
- Třísky mají malý průřez (asi 10 mm až 3 mm), řez je přerušovaný a třísky mají proměnlivý průřez (obdoba s frézováním), při broušení dochází v důsledku velkých plastických deformací a tření třísky k takovým vysokým teplotám (až 1500 °C), že se některé třísky roztaví a shoří.
- Působením velkých měrných řezných sil (odporů) až do výše několika desítek tisíc Mpa, vysoká řezná rychlost (30 m.s^{-1} až 100 m.s^{-1}) a z toho vyplývající krátká doba záběru jednotlivých zrn.
- Z důvodu vzniku velkého tepla při broušení je nutné chladit obrobek i řezný kotouč. Teplo vznikající při broušení oduhličuje povrch obrobek, tak dochází ke vzniku trhlin a ke změnám struktury a také má za následek vznik nepříznivých tahových zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy.
- Otupování ostří jednotlivých zrn brusiva a zanášení pórů třískami způsobuje ztrátu řezivosti. Řezivost se obnovuje pomocí orovnávačů (jednokamenové, více kamenové, ploché, tvarové)

Brousit se dají různé povrchy v různých polohách, proto existuje velké množství druhů broušení.

Podle tvaru obrobené plochy se rozlišuje:

- Rovinné broušení (pro rovinné plochy)
- Broušení dokulata (pro rotační plochy)
- Broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem)
- Tvarové broušení (výroba ozubených ploh, závitů)
- Kopírovací broušení (na NC a CNC strojích)
- Broušení tvarovými brousícími kotouči (pro tvarové plochy)

Rozdělení podle aktivní části brousícího kotouče:

- Obvodové broušení (broušení obvodem kotouče)
- Čelní broušení (broušení čelem kotouče)

Rozdělení podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči:

- Axiální broušení (osa kotouče je rovnoběžná)
- Radiální broušení (brousící kotouč je radiální k hlavnímu posuvu stolu ve zvolené době D)
- Tangenciální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D)
- Obvodové zapichovací broušení (posuv stolu je plynulý radiální)
- Čelní zapichovací broušení (posuv stolu je plynulý axiální)

Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
		Vnější plochy	Vnitřní plochy
Pohyb stolu	průřezový		
	otáčivý		
	Radiální		

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 v_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 v_{fr} - radiální rychlost posuvu kotouče,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv kotouče

Obr. 3.12 Obvodové broušení [4]

		Radiální	Tangenciální	Axiální
Pohyb stolu	průřezový			
	otáčivý			

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 v_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 v_{fr} - radiální rychlost posuvu stolu,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv stolu

Obr. 3.13 Čelní broušení [4]

Broušení jako dokončovací operace má tyto hlavní přednosti:

- Velkou přesnost ($1\text{ }\mu\text{m}$ až $3\text{ }\mu\text{m}$), správnost geometrických tvarů (kruhovitost i pod $0,2\text{ }\mu\text{m}$) a malou drsnost obrobené plochy ($R_a = 0,8\text{ }\mu\text{m}$ až $0,2\text{ }\mu\text{m}$).
- Broušením lze obrábět i velmi tvrdý materiál (kalenou ocel, slinuté karbidy, tvrzenou litinu, atd.)
- Broušením se dají na součásti obrábět velké plochy najednou, zejména při rovinném broušení čelním.
- Broušení je velmi produktivní, jak ukazuje velikost plochy součástí, obrobené za jednotku času.

3.3.2 Přehled základních metod broušení [4]

Vnější broušení „dokulata“:

- S podélným posuvem
- S příčným posuvem (zapichování)
- Kotoučem nastaveným na rozměr
- Krokové (s příčným i podélným posuvem)
- Bezhroté (průběžné, zapichovací, broušení na doraz)
- Bezhrotou v tuhých opěrách

Vnitřní broušení „dokulata“:

- Bezhroté
- Bezhroté v tuhých opěrách

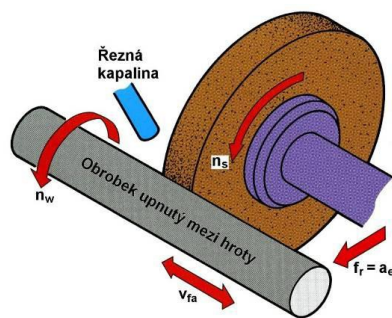
Broušení na plocho (broušení rovinné):

- Obvodem brusného kotouče
- Čelem brusného kotouče

3.3.2.1 Vnější broušení do kulata [4]

- *Axiální obvodové broušení vnějších ploch dokulata*

Pro broušení je často využíváno především při obrábění dlouhých rotačních součástek válcového nebo kuželového tvaru (dlouhé a štíhlé součástky jsou podepřeny lunetou). Popis samotného procesu obrábění: obrobek se otáčí mezi hroty (n_w) a současně koná posuvný pohyb rovnoběžný s osou obrobku (v_{fa}) nebo obrobek koná jen otáčivý pohyb a nástroj koná posuvný pohyb podél osy obrobku. Kotouč nebo obrobek se radiálně posouvá (f_r) o hodnotu pracovního záběru ($a_e = f_r$) na každý zdvih nebo dvojsdvih stolu, a to zajišťuje úběr obráběného materiálu.

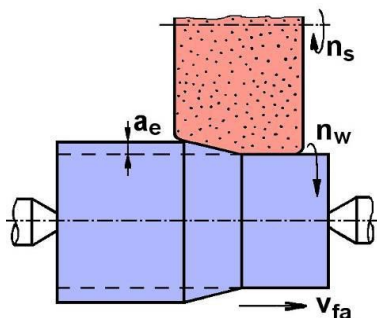


Obr. 3.14 Broušení s podélným posuvem [4]

- *Hlubkové obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“*

Při tomto způsobu broušení se při jednom záběru odebírá vrstva 0,1 mm až 0,5 mm a volí se velmi malý posuv. Patří mezi nejproduktivnější metody broušení. Výkon broušení se oproti jiným metodám zvýší o 25 % až 75 %. Nevýhodou této metody obrábění je zvýšená spotřeba brusných kotoučů.

Následkem rychlého opotřebování kotouče vzniká přechodová kuželová plocha, která v průběhu obrábění postupuje k druhé straně kotouče. Kotouč je potřeba srovnat a opakovat postup obrábění s odstraněním korekce.

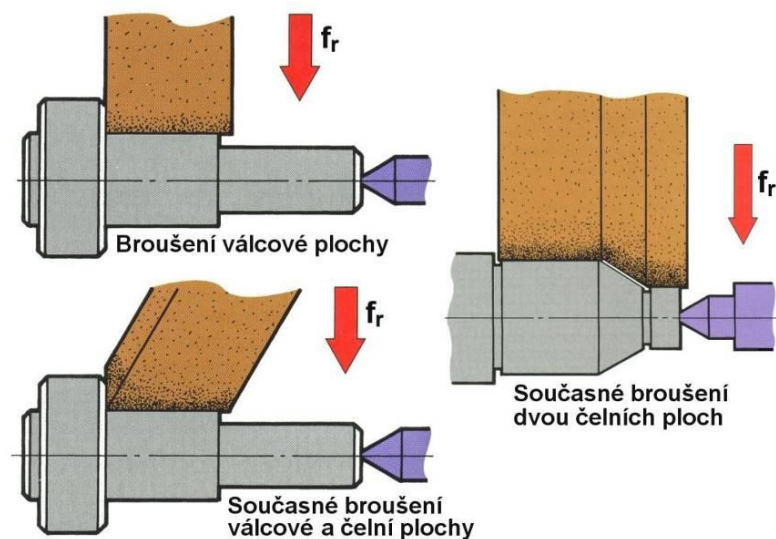


Obr. 3.15 Hlubkové broušení [4]

- *Radiální (zapichovací) obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“*

U tohoto způsobu broušení je velmi důležité mít tuhý obrobek. Je možné využít i šikmý posuv a to v případě, že se současně brousí několik ploch. Řezná i obvodová rychlost je srovnatelná s axiálním broušením, ale výkon broušení je až od 80 % vyšší než u axiálního broušení.

Při broušení válcových, kuželových nebo tvarových ploch se obvykle upíná obrobek (stejně jako při soustružení) mezi hroty. Hlavní řezný pohyb ale vykonává brusný kotouč.



Obr. 3.16 Radiální obvodové broušení vnějších ploch [4]

- *Bezhroté broušení*

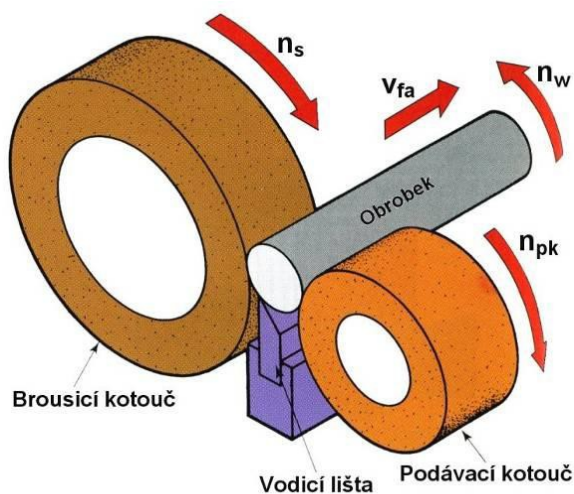
Mezi další způsoby broušení patří bezhroté broušení, které charakterizuje to, že obrobek není upnutý, ale vložen mezi dva kotouče, z kterých jeden je brusný a druhý podávající (obr. 3.17). Střed obrobku podpírá vodící lišta. Osa obrobku je nad osami obou kotoučů.

Jedná se o velmi produktivní způsob broušení a využívá se v hromadné i velkosériové výrobě. Často je využíván při broušení součástí valivých ložisek (základní průměry oběžné dráhy vnějších a vnitřních kroužků radiálních složek).

Při natočení podávacího kotouče se rozloží jeho obvodová rychlost v_{pk} na dvě složky:

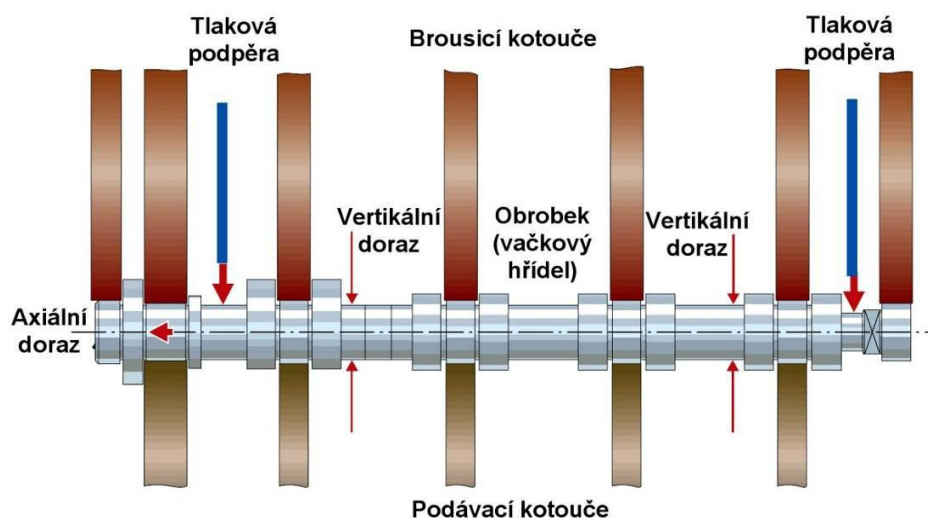
- vodorovnou v_{fa} (zajišťuje axiální posuvový pohyb)
- svislou v_w (otáčí obrobek příslušnou obvodovou rychlostí)

Při zvětšování nebo zmenšování úhlu α se řídí rychlost posuvu.



Obr. 3.17 Bezhroté pružné broušení [4]

Další způsob bezhrotého broušení je bezhroté zapichovací broušení, které se používá u součástí, které mají nákrůžek, u kuželových nebo tvarových ploch, popřípadě i u souosých válcových ploch bez středících důlků.



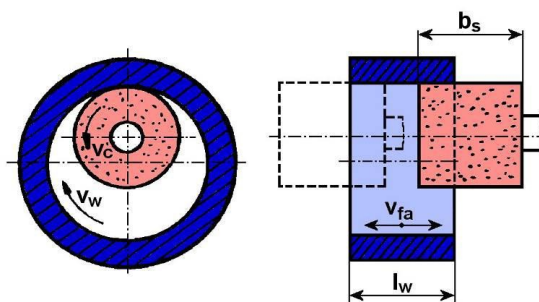
Obr. 3.18 Bezhroté zapichovací broušení válcových ploch [4]

3.3.2.2 Vnitřní broušení do kulata [4]

- *Obvodové axiální broušení vnitřních ploch a „dokulata“*

Využití této metody je především při obrábění obrobku, kdy jeho délka je větší než šířka brousícího kotouče. Kotouč se otáčí uvnitř obráběné díry a posouvá ve směru osy. Obrobek se otáčí kolem své osy proti směru pohybu brousícího kotouče.

Pomocí vnitřního broušení se obrábí především díry. Maximální velikost brousícího kotouče je 0,7 – 0,9 násobek průměru broušené díry. Z toho vyplývá, že u malých děr je nutné použít velmi malé průměry brusných kotoučů. Dochází k velkému namáhání brousících zrn, které vstupuje do procesu oddělování třísky. Kotouč se také velmi rychle opotřebovává, zanáší se, a tím ztrácí řeznou schopnost i geometrický tvar. Podmínky vnitřního broušení jsou z tohoto důvodu nepříznivé, a proto se používají jen v případech, kdy nelze použít jiný způsob výroby přesné díry. Existují mnohem efektivnější způsoby výroby otvorů, např. vystružování, vyvrtávání, honování, atd.



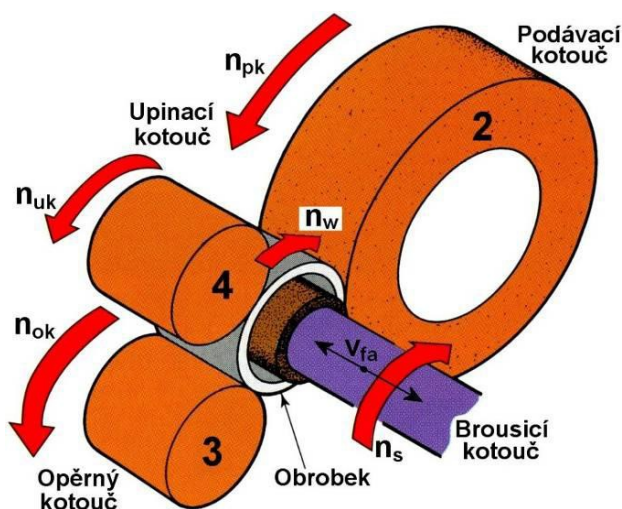
Obr. 3.19 Axiální broušení vnitřních válcových ploch [4]

U malých brousících kotoučů je nutné zajistit velmi vysoké otáčky, které se realizují obtížně. Proto se malé díry brousí nízkými řeznými rychlostmi, což má za následek zhoršení jakosti povrchu a snížení výrobnosti.

Zvýšení obvodové rychlosti obrobku zlepšuje odvod tepla a také klesá možnost tvorby opalů na broušeném povrchu. Z toho však vyplývá kratší doba doteku součásti s kotoučem, což má špatný vliv na drsnost obrobené plochy. Zhoršují se také některé technologické podmínky stroje (zvětšení rozstřížku řezné kapaliny)

- *Bezhraté broušení*

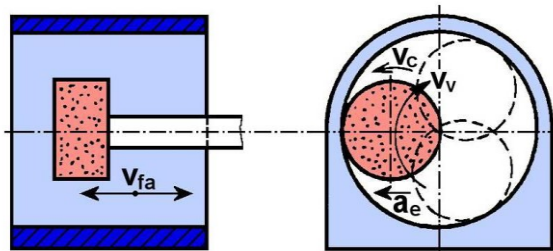
Bezhraté broušení je srovnatelné s axiálním broušením (jsou zachovány veškeré základní pohyby obrobku i brousícího kotouče). Rozdílné je upínání obrobku, kdy je součást vložena mezi tři kotouče (obr. 3.20), (podávací (2) – zajišťuje otáčení součásti, opěrný (3) – určuje polohu součásti, upínací (4) – přitlačuje součást ke kotoučům 2 a 3 a zajišťuje tak upínání během broušení). Při bezhratém broušení vnitřním broušením je možné dosáhnout větší přesnosti ve srovnání s axiálním vnitřním broušením.



Obr. 3.20 Bezhraté obvodové broušení vnitřních ploch „dokulata“ [4]

- *Planetové broušení*

Otvory velkých a těžkých obrobků, které jsou upnuté do sklíčidla a případné obrábění je obtížné, se obrábí planetovým broušením. V tomto případě obrobek stojí a brusný nástroj koná všechny pracovní pohyby – otáčí se okolo vlastní osy, posouvá se ve směru osy broušeného otvoru a současně obíhá okolo osy obrobku. Přesnost planetového broušení je z důvodu malé tuhosti vřetena malá.



Obr. 3.21 Planetové broušení vnitřních válcových ploch [4]

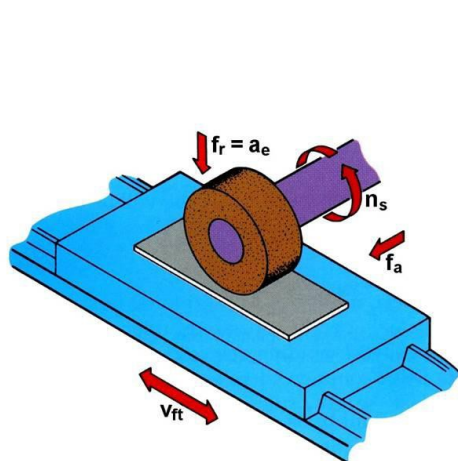
3.3.2.3 Broušení na plocho (broušení rovinné) [4]

- Obvodové rovinné broušení

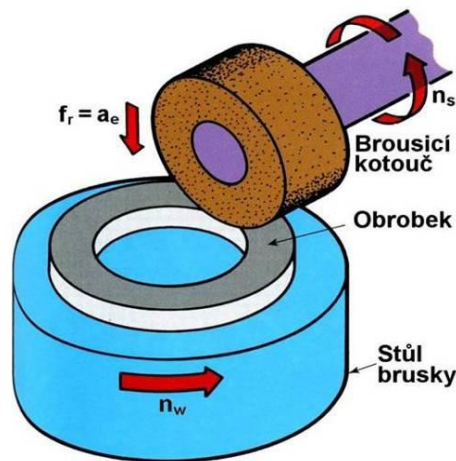
Rovinné broušení se používá obvykle pro obrábění „načisto“ po předcházejícím frézování nebo hoblování. Někdy se používá i místo frézování, především u velmi tvrdých materiálů. Broušení se realizuje obvodem nebo členem brousícího kotouče.

Při broušení obvodem kotouče vykonává obrobek přímočarý vratný nebo kruhový pohyb. Pracovní stůl brousícího stroje s upnutým obrobkem se posouvá v přímočarém směru o hodnotu přímočarého posuvu, který závisí na šířce kotouče (obr. 3.22). Výjimečně vykonává obrobek otáčivý pohyb (obr. 3.23).

Obvodové broušení patří mezi nejpresnější způsob broušení rovinných ploch. Používá se hlavně při broušení přesných rovinných ploch, při výrobě nástrojů, měřidel, přípravků. Je možné brousit i tvarové plochy.



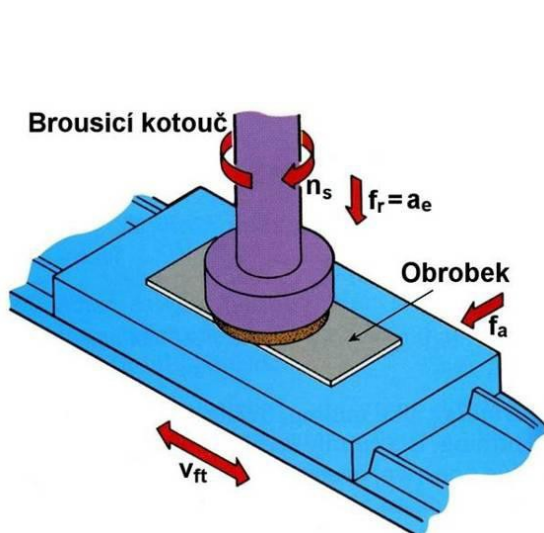
Obr. 3.22 Posuvný pohyb obrobku [4]



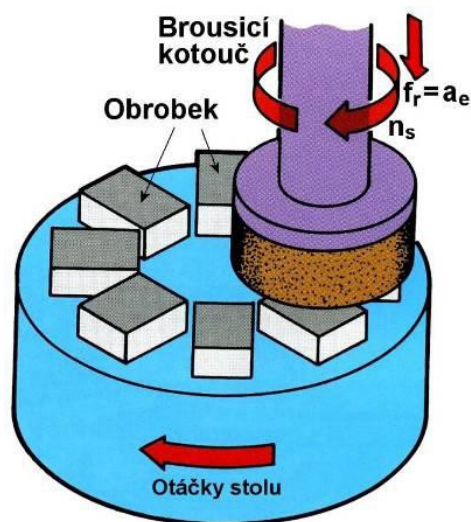
Obr. 3.23 Rotační pohyb obrobku [4]

- Čelní broušení

Pro broušení širších ploch se používá broušení čelem kotouče. Není tak přesné jako broušení obvodové, ale je mnohem výkonnější. Při tomto způsobu broušení je obvykle průměr kotouče větší, než je šířka brusné plochy. Stejně jako u obvodového broušení, tak i u čelního broušení může obrobek vykonávat pohyb otáčivý nebo přímočarý.



Obr. 3.24 Otáčivý pohyb obrobku [4]



Obr. 3.24 Přímocárý pohyb obrobku [4]

Přímocárý pohyb stolu se využívá především pro sériovou a hromadnou výrobu, především malých součástí, jako např. čelní plochy ozubených kol, pístní kroužky. Pro výkonné čelní broušení se používají speciální brusky se dvěma protilehlými brousícími kotouči.

Při broušení kotouči větších rozměrů se obvykle používají segmentové hlavice. Výhodou těchto hlavice je, že lépe dokážou využít brusný materiál, lépe se odstraňuje tříska, řezná kapalina má lepší přístup k místu broušení a broušená součást se méně zahřívá.

- Tvarové broušení

Ve strojírenství se kromě rovinných, válcových a kuželových ploch často vyskytují i tvarové plochy (někdy značně složité). Tyto tvary se brousí tvarovými kotouči nebo kotouči běžných tvarů kopírováním. Broušení kopírováním se provádí pomocí šablon a pantografů. Při tomto způsobu broušení vykonává pracovní pohyb brusný kotouč nebo obrobek na speciálně upravených (kopírovacích) hrotových, bezhrotých i rovinných bruskách.

3.3.3 Brousící kotouč s diamantem [10]

Diamant – je to forma uhlíku krystalizující v kubické modifikaci o specifické hmotnosti $3,52 \text{ g.cm}^{-3}$. Vyskytuje se v přírodní formě a rovněž se připravuje syntézou za vysokých tlaků a teplot. Je to nejtvrdší známý materiál a v Mohsově stupnici zaujímá 10 místo. Další jeho vynikající vlastností je jeho tepelná vodivost a tepelná odolnost do $860 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Za normální teploty je odolný vůči všem chemickým vlivům. Z důvodu afinity

k železu za vysokých teplot není vhodný pro zpracování oceli. Při broušení totiž dochází na styčných plochách diamantového zrna a oceli k značnému vývinu tepla a tím k chemické reakci. To má vliv na změnu struktury jak diamantu, tak povrchu obrobku. Diamant se ale velmi úspěšně využívá na broušení tvrdých a křehkých materiálů jako jsou slinuté karbidy, keramika, sklo, kámen apod.

3.3.3.1 Charakteristika

Aby došlo k optimálnímu využití vynikajících vlastností kotoučů, je nutno volit vhodnou charakteristiku kotouče za použití doporučených podmínek.

- *Druh brusiva*

Výběr brusiva kotouče se volí podle druhu broušeného materiálu. Diamant se nejvíce používá pro broušení tvrdých a křehkých materiálů jako jsou slinutý karbid, slinutý karbid + ocel + pájka, návary obsahující WC a TiC, keramika, žáruvzdorné a žárovečné materiály, sklo, porcelán, tuha, grafit, germanium, křemík, umělé hmoty s abrazivními plnivy např. skelným vláknem.

- *Tvar kotouče*

Kotouče jsou označovány typovým číslem. Toto číslo určuje základní tvar (tj. obvodové, čelní úhlové apod.) a je přizpůsobeno ve většině případů standardu ISO 6104 a 6168.

- *Rozměr kotouče*

Rozměry kotouče se odvíjejí podle firmy, která kotouče vyrábí. Jsou uvedeny v katalogu v tabulce příslušného typu, která obsahuje základní rozměry tj. průměr kotouče, šířku, tloušťku brousící vrstvy, celkovou výšku kotouče, rozměr upínacího otvoru, případně úhel zkosení, radius apod. Po dohodě s odběratelem se mohou vyrobit kotouče jiných tvarů a rozměrů.

- *Průměr brousícího kotouče*

Čím větší je průměr brousícího kotouče, tím příznivější jsou termické a kinematické podmínky broušení, protože brusné zrna je následkem delší ochlazovací dráhy méně namáhané, což příznivě působí na životnost kotouče. Volba průměru závisí na typu brusky, jejíž konstrukce by měla zaručovat dosažení doporučených pracovních rychlostí.

- *Šířka brousící vrstvy*

Zásadně musí být využívána celá šířka brousící vrstvy (neplatí u tvarových kotoučů). Toho lze docílit posuvem obrobku nebo brousícího kotouče přes celou broušenou plochu, nebo použitím užší brousící vrstvy, než je šířka broušené plochy (platí u čelních kotoučů). Úzká brousící vrstva umožňuje vyšší výkon broušení s malým vývinem tepla. Příliš široká

brousící vrstva způsobuje vysokou teplotu v místě řezu, což může mít vliv na snížení výkonu.

- *Tloušťka brousící vrstvy*

Jako základní tloušťka brousící vrstvy čelních kotoučů se doporučuje 2 mm u pryskyřičných pojiv a 1,5 mm u kovových pojiv. Silnější brousící vrstva sice zvýší prodejní cenu nástroje o vyšší obsah brusiva, ale náklady na broušení se sníží.

- *Pojiva brousících kotoučů*

Pojivo ovlivňuje rozhodujícím způsobem výkon broušení, životnost kotoučů, tvarovou stálost, samoostřicí vlastnosti apod. Výběrem pojiva ovlivníme, zda diamantový kotouč brousí s velkým výkonem broušení při malém přitlaku, avšak s kratší životností (měkké pojivo), anebo s velkou životností při nižším výkonu a větším přitlaku (tvrdé pojivo). Pro volbu pojiva je kromě broušeného materiálu a druhu brusiva důležité určit druh operace a způsob broušení.

Kovové pojivo (K) je tvrdší než pryskyřičné. Používá se převážně pro broušení s diamantem. Kovová pojiva se používají výhradně s chlazením.

Pojivo SKM – je velmi tvrdé. Využívá se pro broušení otvorů, kde nedostatečná brousící rychlost je eliminována vysokou tvrdostí pojiva a koncentrací brusiva

Bronzové pojivo – používá se převážně pro broušení slinutých karbidů, keramiky, skla, porcelánu apod.

Speciální pojivo – je určeno pro broušení slinutých karbidů čelními kotouči.

Galvanické pojivo (Ni) se používá všude tam, kde nelze použít klasické technologie výroby brousících kotoučů s diamantem. Většinou se jedná o tvarově složité nástroje. Brusivo v jedné vrstvě je ukotveno k ocelovému tělesu galvanicky nanášeným povlakem niklu. K výhodám kotoučů s galvanickým pojivem patří vysoký brousící výkon, nízké pořizovací náklady, vysoká stálost tvaru a nízký vývin tepla. Nevýhodou je malá životnost daná pouze jednou vrstvou diamantu.

Pryskyřičné pojivo (P) je nejpoužívanějším pojivem, protože se vyznačuje vysokou produktivitou broušení, nízkým vývinem tepla, dobrými samoostřicími vlastnostmi. Pojiva se používají s chlazením. Lze je ovšem použít i bez chlazení za určitých podmínek (úzká brousící vrstva, nižší obvodová rychlost, přitlak, posuv, krátký strojní čas, nižší koncentrace apod.)

3.3.3.2 Zrnitost brusiva

Vliv zrnitosti brusiva na drsnost povrchu je znázorněn v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Vliv zrnitosti brusiva na drsnost povrchu

Zrnitost	Použití	Drsnost povrchu [Ra]
Diamant		
D 213	Výkonné broušení a hrubování, kde je žádán především vysoký výkon broušení	1,2
D 181		
D 151		
D 126	Výkonné broušení a hrubovací operace	0,8
D 107		
D 91		
D 76	Střední broušení, ostření rezných nástrojů	0,4
D 64		
D 54	Dokončovací broušení	0,2
D 46		
D 39	Lapování, jemné broušení	0,1
D 27	Leštění	0,08
D 20		
D 15		
D 10	Leštění	0,05
D 7		
D 6	Leštění	0,025

3.3.3.3 Koncentrace brusiva (K)

Koncentrace brusiva vyjadřuje hmotnostní obsah brusiva diamantu v 1 cm³ brousící vrstvy. Jako základ byla stanovena koncentrace K 100, kde 1 cm⁻³ brousící vrstvy obsahuje 0,88 g brusiva a zaujímá 25 % objemu brousící vrstvy.

Vliv koncentrace na broušení:

- Nízká koncentrace – zaručuje dobré samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje výkon broušení, snižuje vývin tepla, snižuje životnost kotouče, zhoršuje stálost tvaru, zvyšuje drsnost povrchu.
- Střední koncentrace – používá se ve většině brousících operací
- Vysoká koncentrace – zvyšuje životnost kotouče, zlepšuje stálost tvaru, snižuje drsnost povrchu, snižuje výkon broušení, zhoršuje samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje vývin tepla.

4. Návrh progresivní technologie broušení vybraných součástí

Při návrhu progresivnější technologie broušení pro zlepšení kvality povrchu je třeba brát v úvahu spoustu faktorů. Jedním z nich jsou nepochybně chemické a fyzikální vlastnosti broušeného materiálu. Je nutné zvolit nástroj tvrdší, než je sám broušený materiál. Jelikož je slinutý karbid jedním z nejtvrdějších materiálů, volí se proto jako nástroj brousící kotouč s diamantem a pryskyřičným pojivem, který je popsán v teoretické části. Brousit se bude vybraná součást o průměru $D = 215 \text{ mm}$ a je z materiálu SiSiC ROCAR SiG, který je stálejší a nedeformuje se tolik jako SSiC. Jeho charakteristický popis se nachází v kapitole 2.2 a základní informace o jeho vlastnostech nalezneme v tabulce 2.1.

Experiment bude proveden na univerzálním hrotové brusce STUDER S31. Právě volba stroje je dalším důležitým faktorem, který výrazně ovlivní povrch materiálu. Bruska S31 je vhodná jak pro kusové a malosériové výroby, tak i pro velkosériovou výrobu. Vzdálenost mezi hroty brusky jsou $b = 650 \text{ mm}$ až 1000 mm a výška hrotu $h = 175 \text{ mm}$. Lože pro kluzná vedení lineárních os Gradient S103 zajišťují stabilitu stroje, tlumení vibrací, vysokou přesnost a jsou prakticky bezúdržbová. Broušení je naprogramováno na dvě operace (hrubovací a dokončovací), které probíhají následně za sebou. Každá operace obsahuje tři cykly. První cyklus je hrubování, druhý cyklus broušení a třetí cyklus broušení na čisto. [7]



Obr. 4.1 Hrotová bruska STUDER S31 [10]

Je zvolený stroj i materiál broušeného tělesa. Nyní je třeba zvolit přesný nástroj, který bude brousit. Z katalogu firmy Urdiamant je vhodný profilový brousící kotouč s diamantem a pryskyřičným pojivem. Průměr kotouče $D = 400 \text{ mm}$, šířka kotouče

$t = 20 \text{ mm}$ a tloušťka brousící vrstvy je $x = 5 \text{ mm}$. Zrnitost kotouče je D 107 a koncentrace K 100.

Jakmile je zvolený stroj, na kterém bude experiment prováděn, i nástroj, který bude obrobek brousit, je důležité zvolit základní parametry. Řezná rychlost v_c by měla být v rozsahu mezi 28 m.min^{-1} až 50 m.min^{-1} , rychlost posuvu v_f v rozsahu mezi $0,3 \text{ m.min}^{-1}$ až $0,8 \text{ m.min}^{-1}$. Právě rychlost posuvu má největší vliv na kvalitu povrchu broušeného materiálu. Otáčky obrobku n_w by se měly pohybovat mezi 40 ot.min^{-1} až 100 ot.min^{-1} . Hloubka úběru se volí podle tabulky 4.1, kde záleží na jednotlivé operaci či cyklu broušení. Důležitá hodnota je přídavek na broušení, který je vyjádřen v tabulce 4.2. Veškeré hodnoty byly stanoveny na základě zkušenosti pracovníka.

Tab. 4.1 Hloubky úběru v jednotlivých cyklech

Cyklus	1. Operace	2. Operace
Hrubování	0,01 - 0,02 mm	0,01 - 0,02 mm
Broušení	0,01 - 0,02 mm	0,01 - 0,02 mm
Broušení na čisto	0,005 mm	0,005 mm

Tab. 4.2 Přídavky na broušení v jednotlivých cyklech

Cyklus	1. Operace	2. Operace
Hrubování	1,1 - 0,9 mm	0,06 mm
Broušení	0,7 - 0,1 mm	0,04 mm
Broušení na čisto	0,001 mm	0,02 mm

Důležitá je i volba měřicího přístroje, na kterém se budou měřit drsnosti povrchu jednotlivých kusů. Jako vhodným přístroj, který je k dispozici je dotykový profiloměr (drsnoměr) HOMEL Tester T8000. Přístroj je zaměřen na vysokou přesnost, množství parametrů a mnohostranné analýzy. Rozsahy pohybů v ose X až 200 mm, v ose Z až 6000 μm . Vysoké rozlišení v ose Z až 1nm, v ose X až 0,01 μm . [10]

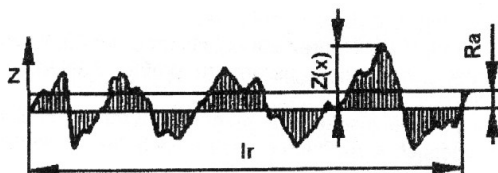


Obr. 4.2 Drsnoměr HOMEL Tester T8000 [10]

Výsledek se bude zaměřovat zejména na strojní čas, za který bude daná součást obroben a na drsnost povrchu. Právě drsnost povrchu nás bude zajímat nejvíce a konkrétně tyto tři hodnoty:

Ra - Střední aritmetická úchylka profilu [9]

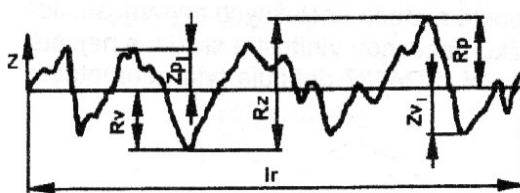
Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r .



Obr. 4.3 Střední aritmetická úchylka profilu Ra [9]

Rz - Největší výška profilu [9]

Součet výšky Z_p největšího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r .



Obr. 4.4 Největší výška profilu Rz [9]

Rt - Celková výška profilu [9]

Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_n .

5. Diskuse experimentu

Ve 3. kapitole jsou uvedeny důležité faktory, které by se neměly opomenout a je nutné je mít promyšlené, než se zahájí samotný experiment. Stroj, na němž se bude experiment provádět, byl zvolen hrotová bruska STUDER S31. Použitý nástroj bude vzhledem k tvrdosti našeho materiálu brusný kotouč s diamantem a pryskyřičným pojivem. K dispozici je zakázka deseti kusů o průměru $D = 215$ mm. Brousit se bude vnější válcová plocha. V první operaci hrubování se brousí na průměr $D = 215,02$ mm, aby byl obrobek

připraven na operaci dokončovací, po které bude mít obrobek finální podobu o průměru $D = 215 \text{ mm}$. V experimentu se budou náhodně měnit parametry broušení, které se stanovily na základě zkušenosti pracovníka a zkoumat, jak se projeví na kvalitu povrchu. Kvalitou povrchu se rozumí správné rozměry a drsnost povrchu. Po dobu celého broušení bude řezná rychlost $v_c = 35 \text{ m.min}^{-1}$. Opotřebenění nástroje je zanedbatelné.

Měření č. 1

Parametry u prvního obrobku byly nastaveny podle pracovníka, který je na základě vlastních zkušeností určil. S těmito parametry by se prováděla celá zakázka u všech deseti kusů.

Při první operaci hrubování na průměr $D = 215,02 \text{ mm}$ byly nastaveny otáčky obrobku $n_w = 40 \text{ ot.min}^{-1}$, rychlost posuvu $v_f = 0,430 \text{ m.min}^{-1}$ a počet jízd na prázdno $I = 3$. Při druhé operaci dokončování na průměr $D = 215 \text{ mm}$ se otáčky zvýšily na $n_w = 60 \text{ ot.min}^{-1}$, ale rychlost se snížila na pouhých $v_f = 0,300 \text{ m.min}^{-1}$. Ovšem počet jízd na prázdno stoupl na $I = 6$. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Zadané parametry 1. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	$a_e \text{ [mm]}$	$p \text{ [mm]}$	$a_e \text{ [mm]}$	$p \text{ [mm]}$
Hrubování	0,9	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,7	0,01	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	$n_w \text{ [ot. min}^{-1}]$	40	$n_w \text{ [ot. min}^{-1}]$	60
Rychlost posuvu	$v_f \text{ [m.min}^{-1}]$	0,430	$v_f \text{ [m.min}^{-1}]$	0,300

Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Výsledné hodnoty 1. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	$t_{str} \text{ [min]}$	8:44
Drsnost povrchu	$Ra \text{ [}\mu\text{m]}$	0,425
	$Rz \text{ [}\mu\text{m]}$	2,764
	$Rt \text{ [}\mu\text{m]}$	3,800

Měření č. 2

U druhého měření se oproti prvnímu nepatrně zvýšily hodnoty hloubky řezu a přídatku na broušení. Hodnoty byly zvýšeny v první operaci hrubování a navíc jen ve druhém cyklu broušení. Zbylé hodnoty se ponechaly stejné. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.3.

Tab. 5.3 Zadané parametry 2. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	0,9	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,6	0,015	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	40	n_w [ot. min ⁻¹]	60
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,430	v_f [m.min ⁻¹]	0,300

Při pohledu do tabulky s výsledky je zřetelné, že se výrazně snížil strojní čas oproti prvnímu měření. Drsnost povrchu se ovšem mírně zhoršila. To vše vlivem zvýšení hloubky řezu a přídatku na broušení. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.4.

Tab. 5.4 Výsledné hodnoty 2. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	7:15
Drsnost povrchu	R_a [μm]	0,423
	R_z [μm]	2,772
	R_t [μm]	3,392

Měření č. 3

U třetího měření se zvýšily pouze otáčky obrobku u dokončovací operace. Zbylé hodnoty jsme ponechali stejné jako u druhého měření. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.5.

Tab. 5.5 Zadané parametry 3. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	0,9	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,6	0,015	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	40	n_w [ot. min ⁻¹]	60
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,430	v_f [m.min ⁻¹]	0,300

Ve výsledku je zřetelné, že zvýšení otáček obrobku u dokončovací operace mělo vliv jak na strojní čas, který se snížil o pár sekund, tak i na drsnost povrchu, která klesla o několik μm . Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.6.

Tab. 5.6 Výsledné hodnoty 3. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	7:06
Drsnost povrchu	R_a [μm]	0,401
	R_z [μm]	2,681
	R_t [μm]	3,414

Měření č. 4

Ve čtvrtém měření se oproti třetímu zvýšil posuv u druhé operace dokončování, ale zároveň se snížily otáčky. Poté se zvýšila hloubka úběru u první operace hrubování, ale jen u prvního cyklu. Ostatní hodnoty se ponechaly. Zadané hodnoty jsou znázorněny v tabulce 5.7.

Tab. 5.7 Zadané parametry 4. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	1,1	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,6	0,015	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	40	n_w [ot. min ⁻¹]	60
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,430	v_f [m.min ⁻¹]	0,450

Při pohledu na výsledné hodnoty je zřejmé, že se vlivem zvýšení posuvu a hloubky úběru snížil strojní čas oproti třetímu měření. Podstatně se zvýšila drsnost povrchu, především důsledkem zvýšení posuvu. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.8.

Tab. 5.8 Výsledné hodnoty 4. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	7:35
Drsnost povrchu	Ra [μm]	0,424
	Rz [μm]	2,995
	Rt [μm]	3,771

Měření č. 5

V pátém měření se opět zvyšovaly otáčky obrobku a posuv, ale tentokrát u první operace. Hodnoty ve druhé operaci zůstaly neměnné. Následně se snížila hloubka řezu v první operaci u prvního cyklu. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.9.

Tab. 5.9 Zadané parametry 5. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	0,9	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,6	0,01	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	70	n_w [ot. min ⁻¹]	90
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,650	v_f [m.min ⁻¹]	0,450

Z výsledku je patrné, že při zrychlení posuvu se snížil strojní čas. Jelikož se zvýšily i otáčky obrobku, drsnost povrchu nepatrně klesla. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.10.

Tab. 5.10 Výsledné hodnoty 5. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	6:58
Drsnost povrchu	Ra [μm]	0,420
	Rz [μm]	2,973
	Rt [μm]	3,503

Měření č. 6

U šestého měření se zachovaly stejné otáčky obrobku i rychlost posuvu u obou operací jako v pátém měření. Změnila se pouze hloubka úběru v první operaci, a to v prvním i druhém cyklu, kdy v prvním cyklu byla hodnota zvýšena a ve druhém podstatně snížena. Dále se v první operaci snížil přídavek na broušení ve druhém cyklu. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.11.

Tab. 5.11 Zadané parametry 6. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	1,1	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,6	0,01	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	70	n_w [ot. min ⁻¹]	90
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,650	v_f [m.min ⁻¹]	0,450

Výsledné hodnoty se opět liší oproti ostatním měření. Strojní čas se snížil důsledkem přidání hloubky úběrů. Ovšem drsnost povrchu se tímto činem nepatrně zvýšila. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.12.

Tab. 5.12 Výsledné hodnoty 6. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	6:35
Drsnost povrchu	R_a [μm]	0,430
	R_z [μm]	2,986
	R_t [μm]	3,489

Měření č. 7

Na sedmé měření se určily hodnoty v první operaci stejné jako u pátého měření. Ovšem snížily se otáčky obrobku i rychlost posuvu. To by se mělo projevit v drsnosti povrchu, kdy by měla být lepší. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.13.

Tab. 5.13 Zadané parametry 7. Měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	0,9	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,6	0,01	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	70	n_w [ot. min ⁻¹]	60
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,650	v_f [m.min ⁻¹]	0,300

Ve výsledku se opravdu potvrdilo, že snížení posuvu i otáček obrobku mělo vliv na drsnost povrchu. Avšak tímto pokusem se výrazně zvýšil strojní čas. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.14.

Tab. 5.14 Výsledné hodnoty 7. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	7:20
Drsnost povrchu	R_a [μm]	0,427
	R_z [μm]	2,905
	R_t [μm]	3,615

Měření č. 8

U osmého měření se ponechaly stejné hodnoty v první operaci jako u sedmého měření. Druhá operace se úplně odstranila, tím se první operace stala operací dokončovací. Zadané hodnoty jsou znázorněné v tabulce 5.15.

Tab. 5.15 Zadané parametry 8. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	0,9	0,02	-	-
Broušení	0,6	0,01	-	-
Broušení na čisto	0,01	0,005	-	-
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	70	n_w [ot. min ⁻¹]	-
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,650	v_f [m.min ⁻¹]	-

Ve výsledku je patrné odstranění jedné operace. Obrobek byl sice obroben za opravdu nízký strojní čas, ale drsnost povrchu je velmi vysoká. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.16.

Tab. 5.16 Výsledné hodnoty 8. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	5:10
Drsnost povrchu	Ra [μm]	0,836
	Rz [μm]	4,010
	Rt [μm]	5,012

Měření č. 9

V devátém měření se opět odebraná operace navrátila. Snížily se otáčky obrobku a také rychlost posuvu v první operaci. Ve druhé operaci se otáčky obrobku oproti sedmému měření zvýšily a rychlost posuvu se ponechala stejná. Po té se zvýšila hloubka řezu v prvním a druhém cyklu u první operace a následně i přídavek na broušení ve druhém cyklu. Zadané hodnoty jsou znázorněny v tabulce 5.17.

Tab. 5.17 Zadané parametry 9. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	1,1	0,02	0,06	0,02
Broušení	0,7	0,015	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min^{-1}]	60	n_w [ot. min^{-1}]	90
Rychlost posuvu	v_f [m. min^{-1}]	0,430	v_f [m. min^{-1}]	0,450

Při změně těchto hodnot je z výsledku zřejmé, že se strojní čas snížil oproti sedmému měření, ale i drsnost povrchu se mírně snížila. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.18.

Tab. 5.18 Výsledné hodnoty 9. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	6:53
Drsnost povrchu	Ra [μm]	0,412
	Rz [μm]	2,803
	Rt [μm]	3,302

Měření č. 10

V posledním desátém měření se snížily otáčky obrobku u obou operací. Navíc se oproti devátému měření snížila i hloubka řezu a přídavek na broušení v prvním i druhém cyklu. Zadané hodnoty jsou znázorněny v tabulce 5.19.

Tab. 5.19 Zadané parametry 10. měření

Cyklus	1. Operace		2. Operace	
	Hloubka úběru	Přídavek na broušení	Hloubka úběru	Přídavek na broušení
	a_e [mm]	p [mm]	a_e [mm]	p [mm]
Hrubování	0,09	0,01	0,06	0,02
Broušení	0,1	0,01	0,04	0,01
Broušení na čisto	0,01	0,005	0,02	0,005
Otáčky obrobku	n_w [ot. min ⁻¹]	40	n_w [ot. min ⁻¹]	60
Rychlost posuvu	v_f [m.min ⁻¹]	0,430	v_f [m.min ⁻¹]	0,300

Výsledný strojní čas je poněkud vysoký a kvalita drsnosti povrchu je podobná jako u prvního měření. Výsledné hodnoty měření jsou znázorněny v tabulce 5.20.

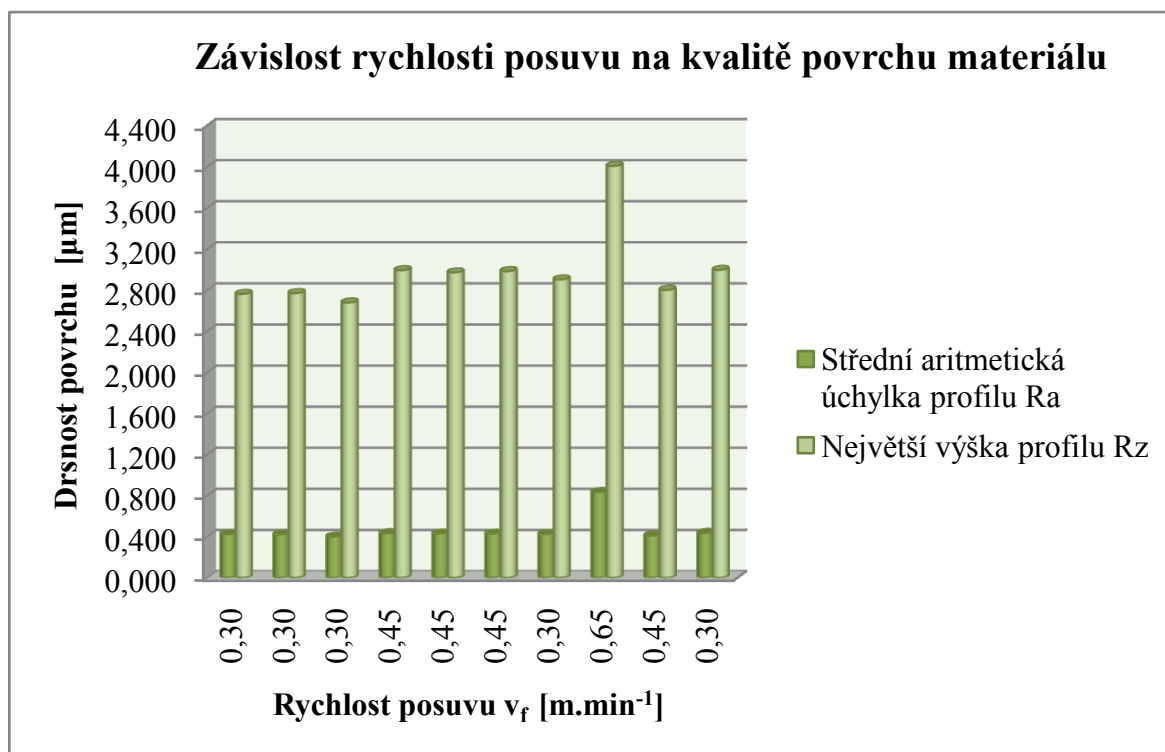
Tab. 5.20 Výsledné hodnoty 10. měření

		Naměřené hodnoty
Strojní čas	t_{str} [min]	8:12
Drsnost povrchu	R_a [μm]	0,437
	R_z [μm]	2,990
	R_t [μm]	3,378

6. Technicko-ekonomické zhodnocení

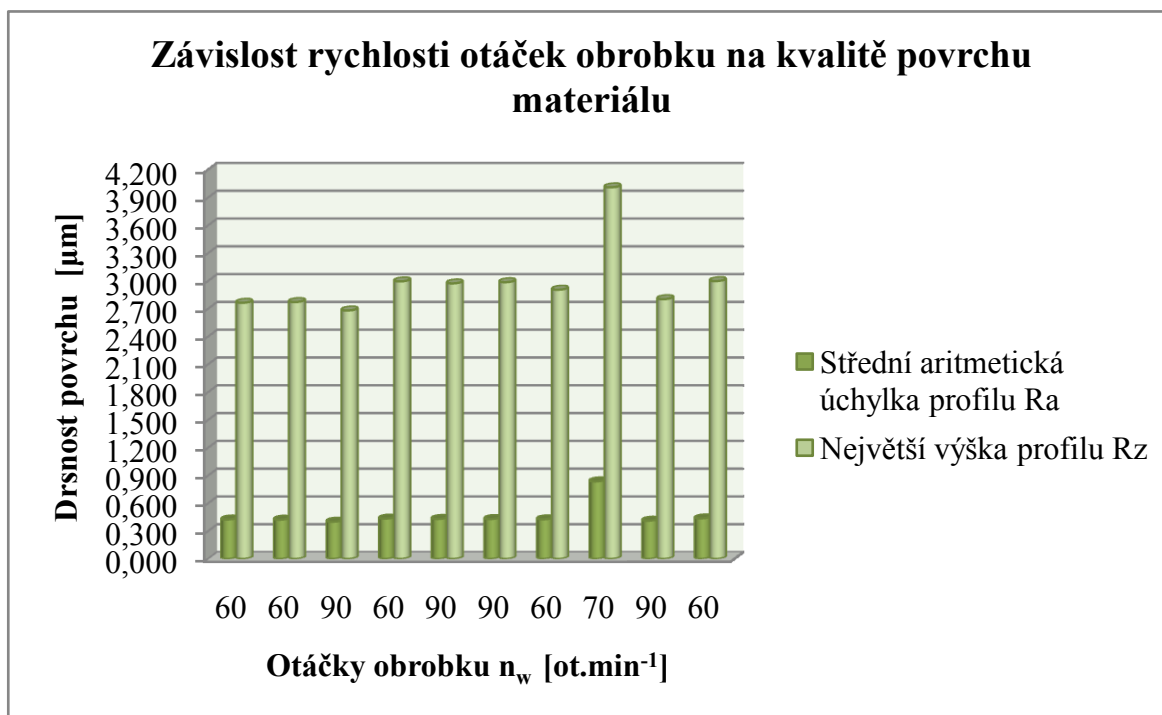
Diskuze experimentu se zabývá měřením, ve kterém se zkoumá vliv náhodné změny parametrů na kvalitu povrchu materiálu. Nyní je třeba provést určitý závěr, ke kterému se došlo během daného experimentu. Byly provedeny pokusy, u kterých se náhodně měnily parametry broušení. Při pohledu na výsledné hodnoty u každého měření je patrné, že zvýšením posuvu, zejména u druhé operace dokončování, se snížila i kvalita povrchu. Z toho plyne, že rychlost posuvu má nejvýznamnější vliv na kvalitu povrchu, tzn. čím je rychlost posuvu vyšší, tím se sníží i kvalita povrchu. Je třeba si uvědomit, že zvyšováním posuvu se zároveň zvyšuje i teplota broušení, ale snižuje se obráběcí čas. V následujícím

grafu jsou znázorněny drsnosti povrchu materiálu v závislosti na parametrech rychlosti posuvu v jednotlivých měřeních.



Obr. 6.1 Graf závislosti rychlosti posuvu na kvalitě povrchu materiálu

Další parametr, který se náhodně měnil a který měl vliv na kvalitu povrchu materiálu, jsou otáčky obrobku. Vlivem zvýšení otáček obrobku se zvyšovala i kvalita povrchu. Z toho plyne, že čím byly otáčky větší, tím se kvalita povrchu zlepšovala. Vysoké otáčky měly však neblahý vliv na teplotu broušení, kdy se teplota přidáváním otáček zvyšovala. Výsledná strojní čas se důsledkem zrychlení otáček snížil. V následujícím grafu jsou znázorněny drsnosti povrchu materiálu v závislosti na parametrech rychlosti otáček obrobku v jednotlivých měřeních.



Obr. 6.2 Graf závislosti rychlosti otáček obrobku na kvalitě povrchu materiálu

V poslední řadě se náhodně zvyšovaly a snižovaly hloubky úběru a velikost přídavku na broušení. Je patrné, že čím vyšší zvolíme hloubku úběru nebo velikost přídavku na broušení, tím se kvalita povrchu stává horší. Bez povšimnutí nezůstane ani teplota broušení, která se vlivem zvýšení hloubky úběru zvyšuje, ale strojní čas je o to nižší.

Nyní je třeba si položit závažnou otázku. Co je pro nás výhodnější a jakým prioritám dáme přednost. Jestli chceme výrobek obrobit v co možná nejrychlejším čase, nebo spíše lpíme na lepší kvalitě povrchu. Každá zmíněná varianta přináší okolnosti, které bychom neměli podcenit. Kdybychom chtěli mít výrobek vyrobený v co možná nejrychlejším čase, je třeba brát v úvahu následné zhoršení kvality povrchu materiálu vlivem zvýšení rychlosti posuvu, hloubky řezu ale i otáček obrobku. Mimo jiné se podstatně zvýší i výkon stroje a tím vzrostou i náklady na výrobu. Ovšem pokud bychom energetické náklady nechtěli zanedbat. Pokud by nám záleželo více na lepší kvalitě povrchu materiálu, než na době, za kterou bude obrobek vyroben, je třeba hodnoty rychlosti posuvu a hloubky úběru snížit a otáčky obrobku zvýšit. Nejvýhodnější by bylo zvolit takové hodnoty, které by nevyžadovaly vysokou energii, výrobek by byl vyroben v co nejrychlejším čase a navíc s co nejlepším povrchem materiálu. Vzhledem k našemu experimentu, který je zaměřen na kusovou výrobu, nehraje čas zas tak velkou roli jako třeba kvalita povrchu materiálu.

Jako ideální poměr parametrů se zvolil v první operaci hrubování rychlejší posuv $v_f = 0,430 \text{ m.s}^{-1}$ až $0,650 \text{ m.s}^{-1}$, otáčky obrobku pomalejší $n_w = 40 \text{ ot.min}^{-1}$ až 60 ot.min^{-1} . Následně potom hloubky úběru v prvním cyklu $a_e = \text{max. } 0,9 \text{ mm}$, ve druhém cyklu $a_e = \text{max. } 0,6 \text{ mm}$ a ve třetím cyklu $a_e = \text{max. } 0,01 \text{ mm}$. Pro druhou operaci je třeba zvolit vyšší otáčky obrobku $n_w = 60 \text{ ot.min}^{-1}$ až 90 ot.min^{-1} a nižší rychlost posuvu $v_f = 0,300 \text{ m.s}^{-1}$ až $0,350 \text{ m.s}^{-1}$, poté snížit i hloubky úběru v prvním cyklu $a_e = \text{max. } 0,06 \text{ mm}$, ve druhém cyklu $a_e = \text{max. } 0,04 \text{ mm}$ a ve třetím cyklu $a_e = \text{max. } 0,02 \text{ mm}$. Vlivem zvolených parametrů se sníží čas obrábění, ovšem u dokončovací metody se zlepší kvalita povrchu materiálu, o kterou nám jde především. Z toho plyne, že bude výrobek vyroben v podstatě za nižší čas a především bude mít lepší kvalitu povrchu materiálu, než s parametry, které by použil pracovník.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá především broušením keramických materiálů, co by dokončovací metoda. Nejprve byla představena firma CeramTec Czech Republic s.r.o. u které se také popsaly materiály vyráběné právě v Šumperské firmě. Dále se přiblížil samotný výrobní proces, kterým prochází každý výrobek. Následně se vysvětlily obecné pojmy a terminologii v obrábění. Poté byla podrobně popsána technologie broušení a brousící kotouč s diamantem, který byl následně použit i v experimentu. V návrhu progresivnější technologie broušení vybraných součástí byl zvolen vhodný stroj, na kterém se experiment prováděl, dále potom nástroj, kterým se součást brousila. Na konec se zvolily vhodné parametry pro broušení a měřicí přístroj, na kterém se měřila drsnost povrchu. V diskuzi experimentu byl zhotoven určitý závěr, ke kterému se dospělo při experimentu, a byly navrženy takové parametry broušení, aby byla kvalita povrchu co nejlepší a celý proces byl proveden v co možná nejlepším čase.

Seznam použité literatury

- [1] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Brno: MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
- [2] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. Top trendy v obrábění, II. Část – Nástrojové materiály. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-9689-2-7.
- [3] VASILKO, K. Analitická teória trieskového obrábania. Prešov : COFIN Prešov, 2007. 338 s. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [4] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. Nové směry v progresivním obrábění. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [5] TICHÁ, Š. Strojírenská metrologie – část 2. Základy řízení jakosti. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2006. 86 s. ISBN 80-248-1209-6
- [6] MRKVICA, I.: Návod ke cvičení z obráběcích nástrojů 1.část. Skripta VŠB, Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1053-9.
- [7] KOLÁŘ, Petr. EMO Hannover potřetí – brousící stroje. *MM průmyslové spectrum* [online]. 18. Prosince 2007. Vydání 12/2007. [cit. 3. května 2011]. Dostupné na WWW:
< <http://www.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-potretri-brousici-stroje> >.
- [8] ČERNOCH, Svatopluk. Strojně technická příručka, 11. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1959, 1872 s.
- [9] TICHÁ, Š. Strojírenská metrologie - část 1. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X
- [10] Podklady od firmy CeramTec Czech Republic s.r.o.

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 – Výkres součásti pro zelené obrábění

PŘÍLOHA 2 – Výkres součásti pro tvrdé obrábění